

基于冷气体的安全气囊模拟起爆试验方法研究

白中浩 龙 瑶 王玉龙

湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室,长沙,410082

摘要:针对安全气囊起爆试验依赖气体发生器的问题,按照国内外安全气囊开发试验法规,采用冷气体压缩替代火药气体发生器的方法,开发了一种安全气囊模拟起爆试验装置。设计了展开装置并采用 ANSYS 软件对其强度及气密性进行了分析,利用 Fluent 软件分析了标定装置中密闭容器的形状对压力-时间($p-t$)曲线的影响,并基于虚拟仪器技术开发了该试验装置的测控系统。最后,进行了两组不同型号安全气囊的模拟起爆试验,结果表明,该试验装置能迅速准确地展开安全气囊,从而验证了该试验方法的有效性和准确性。

关键词:安全气囊;试验方法;冷气体; $p-t$ 曲线

中图分类号:U461.91

DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2014.09.023

Research on Simulation Method of Blasting Test of Airbag Based on Cold Gas

Bai Zhonghao Long Yao Wang Yulong

State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body,
Hunan University, Changsha, 410082

Abstract: Aiming at the fact that the blasting test of airbag is depended on real inflators, according to the test regulations of airbag, a method of compressing cold gas to replace the pyrotechnic inflators was used to develop a test device to simulate the blasting test of airbag. The deployment device used for airbag was designed, and the strength and gas tightness of this device was also analyzed by ANSYS. Meanwhile, the Fluent software was used to analyze the effect of the tank shape of the calibration device on the $p-t$ curve. A measurement and control system was developed based on the virtual instrument. Finally, two group airbags with different types were used to simulate the blasting test, the test results demonstrate that this test device can inflate the airbag rapidly and accurately, and the effectiveness and accuracy of the method were also validated.

Key words: airbag; test method; cold gas; $p-t$ curve

0 引言

近年来,汽车的安全性和舒适性得到了人们极大的关注。在被动安全保护中安全气囊是一种

有效的乘员约束系统设备,能够在汽车发生碰撞时有效地保护乘员^[1-2]。在安全气囊的研发过程中,计算机仿真技术的应用能够在一定程度上缩短研发周期、减少研发成本,然而仿真技术在某些方面有其局限性,如气囊模型折叠难度大,建模和计算耗时较长,而且一般情况下仿真结果仍需要

收稿日期:2012-12-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51105137);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(531107040572)

[10] 庄百亮,单忠德,姜超,等. 汽车防撞梁高强钢热成形工艺研究[J]. 中国机械工程, 2012, 23(2):225-228.

Zhuang Bailiang, Shan Zhongde, Jiang Chao, et al. Research on Ultra-high-strength-steel Hot Stamping Process of Automotive Anti-collision Beam[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2012, 23(2):225-228.

[11] 周记明,齐乐华,陈国定. 热成形中金属本构关系建模方法综述[J]. 机械科学与技术, 2005, 24(2): 212-213.

Zhou Jiming, Qi Lehua, Chen Guoding. Investigation on the Constitutive Relationship of Material Forming in High Temperature[J]. Mechanical Sci-

ence and Technology, 2005, 24(2):212-213.

[12] Sellars C M, Mctegart W J. On the Mechanism of Hot Deformation[J]. Acta Metall, 1966, 14:1136-1138.

(编辑 苏卫国)

作者简介:曹淑芬,女,1989年生。湖南大学材料科学与工程学院硕士研究生。研究方向为金属材料热加工变形行为及成形过程模拟仿真。发表论文2篇。张立强,男,1978年生。湖南大学机械运载及工程学院博士后研究人员,中南林业科技大学机电工程学院讲师。郭鹏程,男,1986年生。湖南大学机械运载及工程学院博士研究生。李落星,男,1968年生。湖南大学机械运载及工程学院教授、博士研究生导师。

进行试验验证^[3]。同时,对安全气囊及其相关部件的研究通常需要做大量的气囊展开试验,或者研究气囊形状、折叠方式,或者测试气囊的起爆强度、饰盖的性能等,所有这些试验项目都是与气体发生器相关的项目,需要投入大量的气体发生器来进行模拟起爆试验。而气体发生器属于一次性产品,不能重复使用,这些试验无疑加大了研发成本,降低了开发效率,因此,开发一种低成本的可替代气体发生器进行试验的装置非常必要。

目前国内外对替代气体发生器进行气囊起爆试验已展开了一些研究,开发出了相应的试验装置。黎启柏等^[4]提出利用储气瓶中的液体二氧化碳为气源,通过触发装置击穿储气瓶,使液态二氧化碳迅速气化并充入气囊使其迅速展开。Duma 等^[5]提出了一套利用压缩空气作为气源的气囊起爆试验装置,该装置中空压机向储气罐提供初始压力,通过与储气罐相连的一个活塞进行气体释放,而活塞的动作则需要另外的触发高压气源来驱动。苏睿^[6]对 Duma 等设计的试验装置进行了改进,采用大通径的快速反应电磁阀替代活塞来控制进气口的开闭,简化了装置的结构。Slaats 等^[7]、Wang 等^[8]设计的气囊起爆试验装置采用了获得专利的超高速高压电磁阀,且储气罐能够承受高压,可与不同的辅助气罐组合得到不同的储气容积。上述研究对安全气囊模拟起爆试验方法进行了有益的探索,但所开发的试验装置仍存在如下不足:①试验装置能够达到的工作压力不足,释放装置执行速度慢,气体释放速度或释放量难以达到试验要求,试验中不能很好地模拟安全气囊快速展开的过程^[4-6];②试验装置可调参数少,灵活度低,能够输出的压力-时间($p-t$)曲线范围窄^[4-6];③某些装置虽能够达到试验要求,但结构复杂,价格昂贵,难以大范围推广使用^[7-8]。

本文根据 GB/T19949-2005《道路车辆安全气囊部件》^[9]、SAE J2238-2001^[10] 和 J1630-2001^[11],采用冷气体压缩的安全气囊模拟起爆试验方法,开发了气囊模拟起爆试验装置。研究了该试验装置的展开装置、标定装置的结构和性能,为了验证该试验方法的有效性和准确性,进行了两组不同型号安全气囊的模拟起爆试验。

1 试验装置总体设计

汽车发生碰撞并达到一定强度时,安全气囊的微处理器(ECU)发出点火信号并由气体发生器向气囊迅速充气,以保证气囊在车内乘员与其接触之前完全展开。气体充入气囊使其膨胀并展

开,整个过程需要 20~40 ms^[12]。目前,安全气囊气体发生器主要有三种类型:烟火式、压缩气体式和混合式。研究表明,压缩气体式气体发生器具有最优的一致性^[7]。良好的一致性能最大程度地消除同种型号气体发生器充气时的表现差异,对安全气囊折叠方式优化、气囊泄气孔或拉带设计、气囊饰盖设计等需要进行多次对比验证试验的研究项目具有重要意义。因此,本文的试验装置使用压缩气体向气囊充气使其迅速展开来模拟安全气囊的起爆过程,主要包括展开装置、标定装置和测控系统三个部分,如图 1 所示。

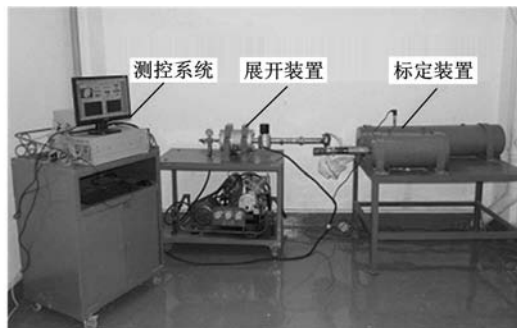


图 1 安全气囊模拟起爆试验装置

(1)展开装置。气囊的迅速展开需要在极短的时间内充入大量的气体,因此既要求所设计的展开装置保证具有足够高的工作压力,又要求保证具有足够快的压缩气体释放速度。为满足上述要求,展开装置采用能够输出超高压、洁净的冷却压缩气体的空压机作为气源,同时使用特制的大口径、高速高压电磁阀作为压缩气体的释放装置。

(2)标定装置。气体发生器的性能主要通过 Tank 试验(密闭容器试验)来进行分析,由试验测得的 $p-t$ 曲线是对气体发生器的充气时间和充气压力进行评价的主要依据。安全气囊模拟起爆试验装置替代气体发生器进行试验,首先需要复制气体发生器 Tank 试验的 $p-t$ 曲线,因此需根据法规要求设计标定装置来对展开装置输出的 $p-t$ 曲线进行标定。

(3)测控系统。本试验装置属于高压系统,在试验过程中需要实现对电磁阀、空压机的控制和气体压力信号等的采集与分析,因此开发了基于虚拟仪器技术 LabVIEW 平台的测控系统。

试验装置测控系统的硬件安装在控制台内,包括多功能数据采集卡、控制电路板、接口板卡等部件。当空压机向储气罐充气时,气压传感器实时采集罐内压力,并将此压力值和设定值进行比较,当储气罐内压力达到设定值时,计算机通过 DO 电路关闭空压机。在展开装置向标定装置充气进行 $p-t$ 曲线标定时,也需要通过压力传感器

实时采集和分析密闭容器内气体的压力信号。SAE J2238-2001 关于传感器参数的规定主要包括:精度为 ± 0.5% (满量程), 共振频率大于 5 kHz, 响应时间小于 1/3 ms。本试验装置选用的气压传感器的各项参数满足上述规定, 量程分别为 0~0.5 MPa 和 0~20 MPa。

采用 LabVIEW 中条件结构的嵌套来实现储气罐内气体压力的实时检测, 同时控制采集卡的 DO 输出控制空压机和电磁阀的相应动作。通过 While 循环实现气压信号的连续采集, 使用 For 循环结构将采集到的电压信号换算成压力和对应的时刻值, 然后进行实时显示和数据保存, 其原理如图 2 所示。

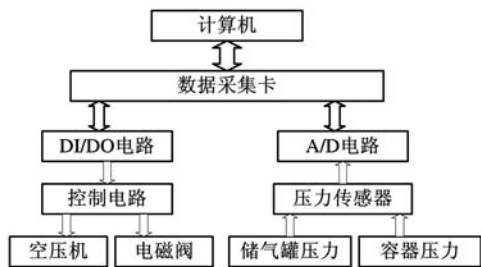
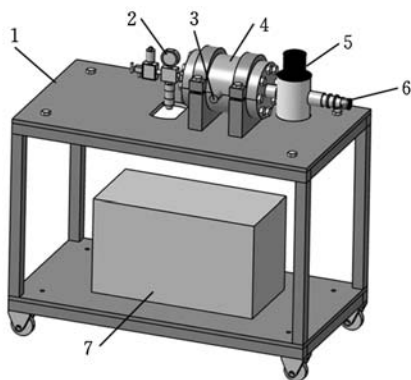


图 2 试验装置测控系统原理图

2 压缩气体展开试验方法及实现

2.1 展开装置的结构设计

展开装置的结构如图 3 所示, 空压机通过三级压缩可以将常压空气压缩至 0~20 MPa, 且输出的压缩气体经过了过滤和冷却, 可以直接通过进气管路元件充入储气罐。进气管路元件能够保证充气时气流稳定和系统安全, 储气罐上安装的气压传感器能够精确地读出储气罐内压缩气体的压力。电磁阀可在测控系统的控制下迅速执行打开的动作, 将储气罐内的压缩气体快速释放。释放的压缩气体最终经过放气管上安装的气体流量



1. 机架 2. 进气管路元件 3. 压力传感器
4. 储气罐 5. 电磁阀 6. 气体流量控制装置 7. 空压机

图 3 展开装置结构图

控制装置快速喷出, 或充入标定装置进行 $p-t$ 曲线标定, 或充入折叠好的安全气囊将其迅速展开。

2.2 压缩气体展开动态分析

气体发生器向气囊充气时, 气囊处于折叠状态, 基本无气体, 外界为大气压力, 而气体发生器产生气体的压力则要远高于大气压。因此, 在向气囊充气的绝大部分时间内, 气体发生器喷嘴进口压力和出口压力的比值远大于临界值, 喷嘴处气体的流动处于临界或超临界流动状态^[13]。为了能够真实地模拟气囊展开过程, 首先应保证充气过程中气体的流动保持为临界或超临界流动状态, 这就要求储气罐内压缩气体的压力必须足够高。为了简化计算, 将试验装置中储气罐内压缩气体视为理想气体, 又因气囊充气过程时间极短, 假设气体来不及与外界发生热交换, 且无内部热源, 故可将向气囊充气的过程视为绝热过程, 气体流动为等熵流动。根据可压缩理想气体等熵流动过程推导出的壅塞流质量流量公式为^[14]

$$q_m = 0.04 \frac{AP_0}{\sqrt{T_0}} \quad (1)$$

式中, q_m 为流出储气罐的气体质量流量; A 为气囊充气连接管截面积; p_0 为储气罐内气体的压力; T_0 为储气罐内气体的温度。

以标准 60L 副驾驶侧安全气囊为例, 计算气囊完全展开瞬间充入的气体质量。假设气囊从开始充气到完全展开的时间为 30 ms, 刚开始充气时气囊处于折叠状态, 故其内部气体质量为零; 完全展开时, 气囊内部压力根据 SAE J1630 中图例 1 可知相对压力约为 20.7 kPa (3 psi)。则一定容积内气体质量可由下式算出:

$$m = \frac{VMP}{RT} \quad (2)$$

式中, m 为气囊完全展开时内部的气体质量; M 为气体摩尔质量, $M = 29 \text{ g/mol}$; V 为气囊容积, $V = 0.06 \text{ m}^3$; p 为气囊内的绝对压力, $p = 122.025 \text{ kPa}$; R 为普适气体常数, $R = 8.31 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; T 为气囊内部温度, $T = 293 \text{ K}$ 。

根据式 (2) 计算得到需要充入气囊的气体质量为 87.2 g。则 30 ms 内进入气囊内气体的平均质量流量为

$$q_m = m/t \quad (3)$$

计算得出的平均质量流量 $q_m = 2.9 \text{ kg/s}$ 。

储气罐向气囊充气至气囊完全展开的过程中, 进入气囊的气体质量流量即为流出储气罐的气体质量流量。将根据式 (3) 计算得到的 q_m 代入式 (1), 式 (1) 中储气罐内压缩气体的温度 T_0 取 300 K, 充气管截面积 A 综合电磁阀通径、管道内径等因素取为 250 mm^2 , 则最终计算得到的储气

罐内压缩气体的压力平均值 p_0 为 5.1 MPa。考虑到气囊充气过程中管道的阻力和气囊自身的泄漏,将 p_0 圆整为 6 MPa。因为上述计算得到的 p_0 为储气罐内压缩气体的平均值,实际试验中压力要求会大于 6 MPa,故将试验装置能够达到的最大工作压力设为 12 MPa,同时,取安全系数 S 为 1.5,因此以展开装置最大可承受压力为 20 MPa 进行强度及气密性分析。

2.3 展开装置强度和气密性分析

由上述计算分析,储气罐能够承受的最大压力必须达到 20 MPa。按照中国压力容器标准 (GB150-2011),设计压力为 20 MPa 的压力容器属于高压容器。展开装置中储气罐的设计采用罐体整体成形,两端端盖通过高强度螺栓紧固在罐体上。罐体上开有安装气压传感器的螺纹孔,两端端盖上分别开有进出气口。罐体内径为 120 mm,长度为 200 mm,罐体和端盖的壁厚为 40 mm,材料采用 Q235 钢,紧固螺栓采用 12.8 级高强度螺栓。

本文采用 ANSYS 软件对储气罐静态强度进行分析。首先,在 HyperMesh 软件环境中建立储气罐的有限元模型,该模型共包括 12 166 个节点和 8781 个单元,单元类型为 Beam188、Solid45。储气罐罐体和端盖壁厚为 40 mm,所以采用 Solid45 实体单元进行模拟,螺栓用 Beam188 梁单元进行模拟。储气罐材料参数按照 Q235 钢材料参数进行赋值,其中弹性模量 E 取 210 GPa,泊松比为 0.3。储气罐通过两个抱箍固定在机架上,对罐体与抱箍接触处单元节点的 6 个自由度进行约束。储气罐可承受的最大压力为 20 MPa,这些载荷是均布在其内壁的,所以用大小为 20 MPa 的均布载荷施加在模型内部单元上进行模拟,载荷的方向垂直单元的中心。将所建立的有限元模型导入到 ANSYS 机械结构分析模块中进行计算,并将计算结果导入 Hyperview 软件进行后处理,应力云图见图 4。

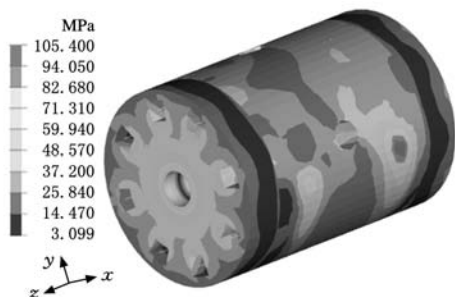
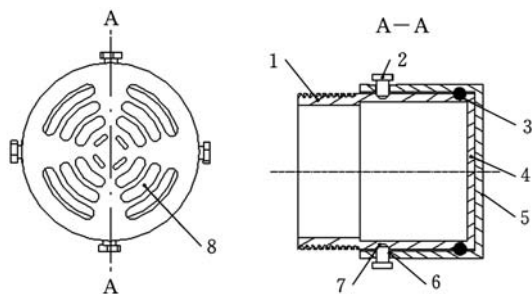


图 4 储气罐应力云图

储气罐最大应力为 105.4 MPa,发生在储气罐与抱箍接触处,Q235 钢的屈服极限为 235 MPa,所以设计的储气罐强度满足要求。仿真结果位移云图显示,储气罐的最大变形发生在出气口处,其数值为 0.096 mm。由于端盖上采用了密封圈,此变形量并不影响储气罐的密封性,所以储气罐的刚度满足密封的要求。综合以上分析,储气罐在最大可承受压力的载荷条件下,其强度和刚度均满足要求,能够保证安全性和密封性。

2.4 气体流量控制装置设计

气体流量控制装置通过螺纹安装在与气囊连接的充气管的出气口,调节此装置能够改变式(1)中充气管截面积 A 的大小,进而调节压缩气体流出的速度,其结构如图 5 所示。



1. 外螺纹 2. 紧固螺钉 3. 密封圈
4. 内筒 5. 外筒 6. 螺纹孔 7. 紧固槽 8. 通孔

图 5 气体流量控制装置结构图

气体流量控制装置由内筒、外筒、密封圈和紧固螺栓组成,内筒外圆面和外筒对应位置的内圆面上开有密封槽,密封圈安装在密封槽里,内筒和外筒相接触的端面上开有位置和大小一致的若干通孔,内筒通过其一端的外螺纹固定在出气管上,外筒可绕内筒转动,转动一定角度后,内外筒相对的通孔面积发生改变。内筒外圆面上还开有紧固槽,外筒在内筒紧固槽对应的圆周上等距开有四个螺纹孔,外筒可以通过紧固螺栓锁紧在内筒上。

3 安全气囊模拟起爆标定装置分析及设计

3.1 容器形状对压力-时间曲线影响分析

气体发生器是安全气囊能够迅速展开的动力来源,其性能需要进行 Tank 试验来分析。Tank 试验是将气体发生器安装在具有一定容积的密闭容器中,然后点爆气体发生器并通过容器壁上安装的气压传感器进行容器内压力的测量,从而得到密闭容器内产生气体的 $p-t$ 曲线。根据 Tank 试验测得的 $p-t$ 曲线是对气体发生器向安全气囊充气特性进行评价的主要依据,而根据 $p-t$ 曲线计算出的质量流速-时间曲线 ($M-t$ 曲线)也

可作为参考^[15]。一般情况下,气体发生器 Tank 试验的 $p-t$ 曲线是已知的,所以安全气囊模拟起爆试验装置在替代气体发生器进行试验之前首先要复制气体发生器的 $p-t$ 曲线,这需要通过展开装置向标定装置充气来完成。同时,通过标定装置,展开装置不仅能够复制现有气体发生器的 $p-t$ 曲线,还能够一定范围内输出任意的 $p-t$ 曲线来满足其他的开发需求。

标定装置的功能类似于 Tank 试验中的密闭容器,具有一定的容积且容器壁上安装有气压传感器。SAE J2238-2001 中,对驾驶员侧安全气囊气体发生器进行 Tank 试验的密闭容器容积规定为 (28.3 ± 0.28) L 或 (60 ± 0.60) L;对于乘员侧则规定为 (60 ± 0.60) L、 (100 ± 1.0) L 或 (146 ± 1.5) L。但是,该规范对密闭容器的形状没有作出具体规定,故本文从所设计的标定装置出发,利用 Fluent 软件对两个容积都为 60 L 且内径相同而接头形状不同的密闭容器进行了充气时容器内压力变化的仿真计算,以分析不同接头形状的容器对所测得的 $p-t$ 曲线的影响。由于容器本身结构特点为轴对称,为减少计算量,可将三维模型简化为二维模型且取其一半进行建模^[16]。首先在 Gambit 软件中建立该充气系统的二维模型(图 6),然后进行网格划分,并设置各边界条件,将完成前处理的模型导入 Fluent 软件。



图 6 密闭容器平接头和圆接头分析模型

首先将储气罐内初始压力设置为 10 MPa,连接管道和密闭容器内气体压力为大气压,在距离容器进气口分别为 300 mm 和 600 mm 的近壁面处设置观察点,可对这两个观察点分别采集到的压力值取平均,以减小因观察点离进气口远近所带来的压力差异。选用耦合求解器进行非定常计算,采用理想气体模型对储气罐内压缩气体进行模拟,由于容器内气体流动为高速流动,时间步长必须足够小,故将时间步长设置为 $10 \mu\text{s}$ 。每个时间步长内迭代计算步数最大为 300,计算气体的流动时间为 0.1 s,最终得到的两个不同接头形状密闭容器内气体的 $p-t$ 曲线如图 7 所示。

从仿真分析得到的两条 $p-t$ 曲线可知,当展开装置向两种不同形状的标定容器充气时,两端为平接头的容器内的气体流动较为平稳,而两端分别为圆接头和平接头的容器内部气体压力波动

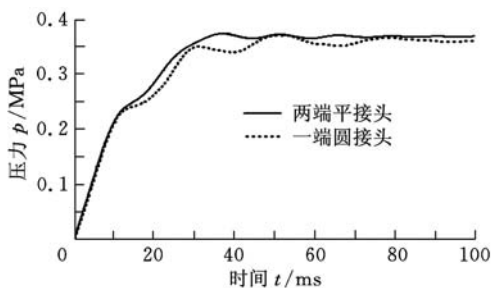


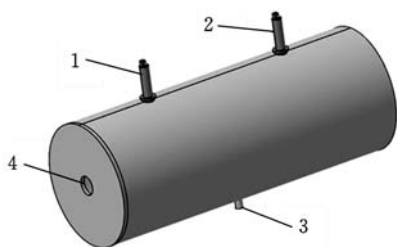
图 7 两个不同形状密闭容器的 $p-t$ 曲线

较大,这可能是由于气流进入遇到圆形接头的阻挡产生了更加复杂的流动的缘故,但两种容器内的气体压力上升趋势和最终数值是一致的。

因此,仿真分析表明在同样容积下这两个不同接头形状的密闭容器对于其内部气体 $p-t$ 曲线的影响并不明显。

3.2 安全气囊模拟起爆标定装置的设计

根据上述分析,所设计的安全气囊模拟起爆标定装置包括容积为 60 L 和 28.3 L 两种规格的密闭容器,采用两端平接头的结构。图 8 为 60 L 密闭容器的结构图(28.3 L 容器仅长度尺寸不同)。该 60 L 密闭容器内径为 325 mm,容器长为 723 mm,其一端进气口 4 的近端装有气压传感器 1,远端装有气压传感器 2,容器下部装有排气阀 3,能够排出容器内部残余气体和积水。



1.2. 气压传感器 3. 排气阀 4. 进气口

图 8 60 L 密闭容器结构图

4 安全气囊模拟起爆试验方法的试验验证

在进行选定型号气体发生器的 $p-t$ 曲线复制时,调节展开装置中储气罐内的初始充气压力可以改变标定装置中密闭容器内气体压力上升的速度和最终的压力;改变出气管处气体流量控制装置的相对通孔面积可调节密闭容器内的压力上升速度;同时,在一定情况下还可以改变充入储气罐内气体的种类来调节密闭容器内气体的 $p-t$ 曲线,如采用更轻的气体(如氦气)可提升充气速度等。一般情况下,通过仿真和实验结合,可复制出某型号气体发生器的 $p-t$ 曲线。如图 9 所示,利用容积为 60 L 和 28.3 L 的密闭容器复制对应气囊体积气体发生器的 $p-t$ 曲线。

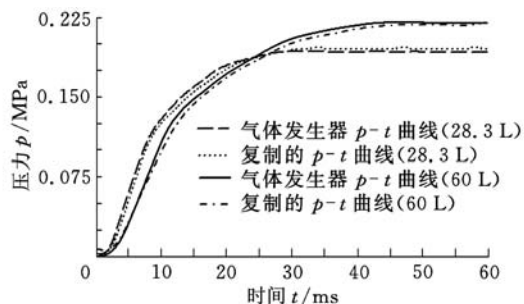
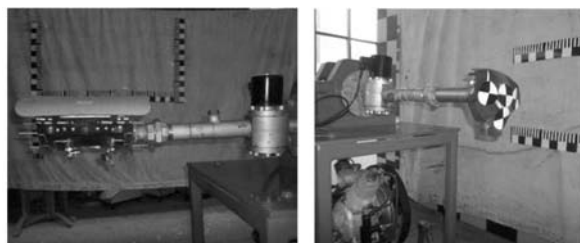
图 9 复制气体发生器的 $p-t$ 曲线

图 9 中,由于电磁阀为先导式电磁阀,需要依靠流体在关闭件周围形成压差才能将阀门打开,所以复制气体发生器 $p-t$ 曲线时标定装置测到的起始压力会稍大于零值。复制完该气体发生器 Tank 试验的 $p-t$ 曲线后,保持展开装置充气压力、气体流量控制装置通孔面积等各项参数不变,将安全气囊安装在充气管上即可进行安全气囊模拟起爆试验。

本文中安全气囊起爆验证试验进行了乘员侧气囊和驾驶员侧气囊两组,每一组分别采用两个同规格的气囊,其中一个为完整的安全气囊模块,模块中气体发生器的 $p-t$ 曲线已被复制,同时将另一个折叠好的且去除了气体发生器的气囊与展开装置密封连接,以进行起爆试验,如图 10 所示。

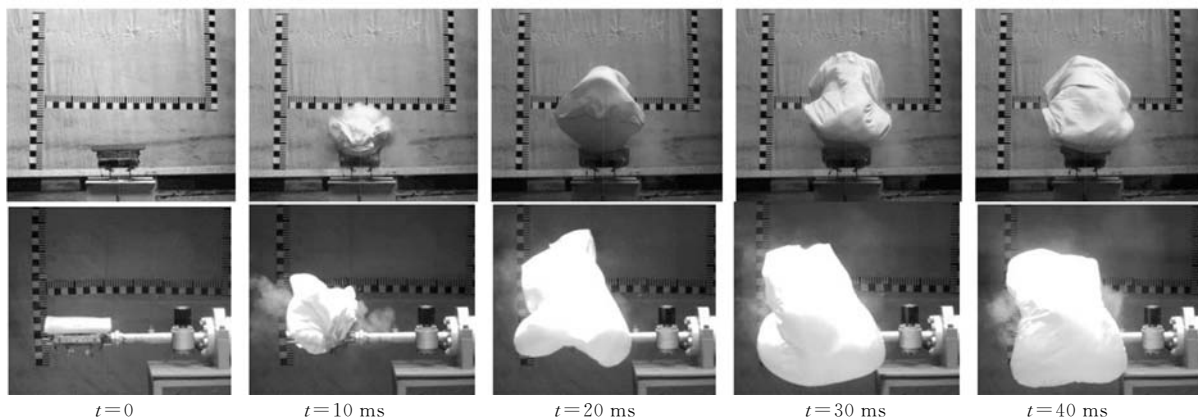


(a) 乘员侧气囊

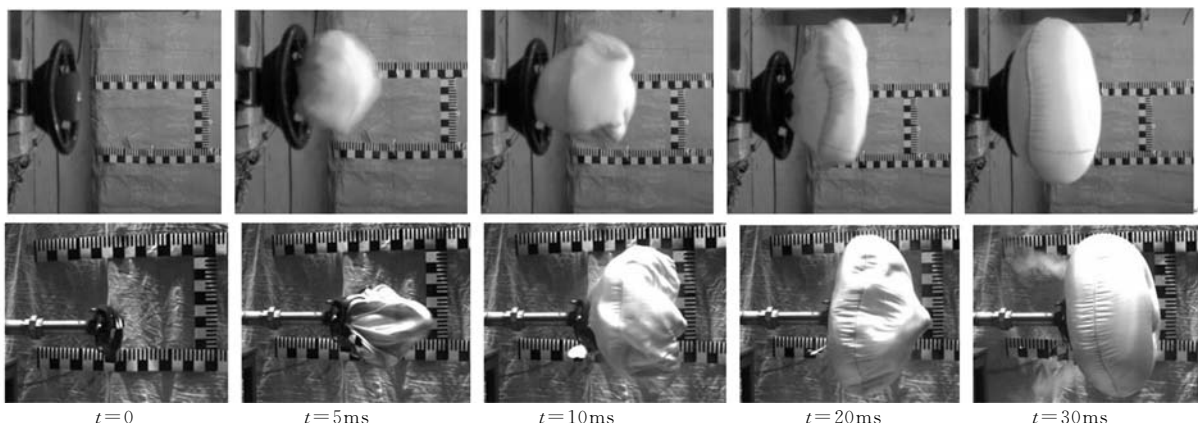
(b) 驾驶员侧气囊

图 10 安全气囊与展开装置连接

安全气囊起爆时,其展开过程通过高速摄像仪进行记录,用高速摄像仪采集到的两组安全气囊起爆展开过程如图 11 所示。



(a) 60 L 安全气囊展开过程



(b) 28.3 L 安全气囊展开过程

图 11 安全气囊起爆验证试验

图 11 分别为不同时刻原气体发生器气囊起爆图像和对应的模拟起爆装置起爆图像。从不同时刻的展开图片可以看出,安全气囊展开装置能够迅速有效地起爆安全气囊,且气囊冲出的速度和展开体积与由实际气体发生器起爆的气囊基本

一致,因此也验证了所设计的试验装置能够有效地替代气体发生器进行气囊起爆试验。此外,从图 11 中可以看到,展开装置内压缩气体迅速充入气囊时,压缩气体因膨胀做功温度降低,产生了雾状水汽,而实际气体发生器产生的是高温气体,气

体温度的差异会影响气体的流速、压力上升速度、气袋织物的透气率等,因此使用压缩的冷气体来模拟安全气囊的起爆需要更高的压力来弥补向气囊充气时因温度降低带来的压力损失,这也对系统能够达到的工作压力提出了更高的要求。

5 结语

根据国内外相关法规并采用冷气体压缩的安全气囊模拟起爆试验方法,设计了安全气囊模拟起爆试验装置,主要包括展开装置、标定装置和测控系统三个部分。为了检验该试验方法的有效性,进行了两组安全气囊模拟起爆验证试验,结果表明,由压缩冷气体充气展开的安全气囊与由实际气体发生器展开的安全气囊二者冲出的形态基本一致,能够较好地满足国内外安全气囊试验法规的要求,可替代现有的火药气体发生器进行起爆试验,同时还能够根据开发需要在一定范围内输出任意的 $p-t$ 曲线。与国内外现有的装置相比,该试验装置具有成本低、结构简单、紧凑、可调参数多、工作压力高、气体释放速度快、操作方便等特点。因此,本文的工作为安全气囊及相关部件的研发和类似试验装置的进一步研究打下了较好的基础。

参考文献:

[1] 张金换,杜汇良,马春生,等. 汽车碰撞安全性设计[M]. 北京:清华大学出版社,2010.

[2] 黄晶,钟志华,胡林,等. 新型管式安全气囊的防护性能分析及结构优化[J]. 机械工程学报,2009,45(6):107-112.
Huang Jing,Zhong Zhihua,Hu lin,et al. Protecting Performance Analysis and Structural Optimization of a Sandwiched Tube-type Airbag[J]. Journal of Mechanical Engineering,2009,45(6):107-112.

[3] Zhang Honglu,Raman S,Gopal M,et al. Comparison of CFD Integrated Airbag Models in LS-DYNA,MADYMO and PAM-CRASH[J]. SAE Paper,2004-01-1627.

[4] 黎启柏,刘智砚,董铸荣. 利用液体二氧化碳对安全气囊的充气过程分析[J]. 重庆科技学院学报,1999,14(3/4):179-181.
Li Qibai,Liu Zhiyan,Dong Zhurong. Process Analysis of Airbag Inflation with Liquid CO₂[J]. Journal of Chongqing University of Science and Technology,1999,14(3/4):179-181.

[5] Duma S M,Rudd R W. A Pneumatic Airbag Deployment System for Experimental Testing[J].

Journal of Passenger Cars,1997,106(6):214-222.

[6] 苏睿. 安全气囊试验系统设计与复合管式安全气囊研究[D].长沙:湖南大学,2006.

[7] Slaats P M,Pitonyak A J,Wipasuramonton P,et al. Alternative Airbag Evaluation Methodology through Cold Gas Inflation System[J]. SAE Paper,2008-01-0352.

[8] Wang D,Willams C,Miller C. The Use of Cold Gas System in Airbag Cushion Evaluation[C]//2008 China International Conference of Automotive Safety Technology. Shanghai,2008:101-105.

[9] 中国国家标准化管理委员会.GB/T19949-2005 道路车辆 安全气囊部件[S].北京:中国标准出版社,2005.

[10] SAE J2238. Airbag Inflator Ballistic Tank Test Procedure Gas Generators Used in Inflatable Restraint Systems[S]. Warrendale,PA: Society of Automotive Engineers Inc.,2001.

[11] SAE J1630. Driver or Passenger Airbag Module Deployment Test Procedure[S]. Warrendale,PA: Society of Automotive Engineers Inc.,2001.

[12] 刘子建,黄天泽,张建华,等. 安全气囊对汽车乘员碰撞损伤防护的研究[J]. 机械工程学报,2001,37(5):12-17.
Liu Zijian,Huang Tianze,Zhang Jianhua,et al. For Occupant Injury Prevention from Vehicle Impacts[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2001,37(5):12-17.

[13] 王积伟,章宏甲,黄谊. 液压与气压传动[M].2版.北京:机械工业出版社,2005.

[14] 史佚,陈乾斌,司冀. 气动元件等温流动近似流量公式的探讨[J]. 液压与气动密封,2010(9):19-22.
Shi Yi,Chen Qianbin,Si Ji. An Approach to Approximate Isothermal Flow-rate Formula for Pneumatic Components; Also an Discussion on Choosing b [J]. Hydraulics Pneumatics and Seals,2010(9):19-22.

[15] 刘建斌,陈平霞. 安全气囊气体发生器 Tank 试验中 $p-t$ 曲线的分析[C]//2007年中国汽车工程学会年会.天津,2007:264-267.

[16] 李进良,李承曦,胡仁喜,等. 精通 Fluent6.3 流场分析[M].北京:化学工业出版社,2009.

(编辑 苏卫国)

作者简介:白中浩,男,1978年生.湖南大学机械与运载工程学院副教授、博士.主要研究方向汽车车身设计及安全、汽车电子。
龙 瑶,男,1987年生.湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室硕士研究生。
王玉龙,男,1988年生.湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室博士研究生。